Der Einfluss von Oxydbildung und thermischer Behandlung auf den Magnetismus des Kupfers.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Hohen philosophischen Fakultät

der

Vereinigten Friedrichs-Universität Halle-Wittenberg

ACAD. LUGD. BAT. BIBL.

vorgelegt von

Feodor Behnsen

aus Magdeburg.

Halle a. S.
Buchdruckerei von Heinrich John.
1911.

Referent: Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. E. Dorn.

Meiner Braut

gewidmet.

Inhalt.

Seite

Einleitung 7

I. Permanenter Magnetismus.

1. Versuchsanordnung 9
2. Bestimmung des magnetischen Moments der Vergleichsperlnadeln 10
3. Das Magnetfeld 14
4. Versuche mit Kupferoxyd der Firmen Merck und Kahlbaum und dem aus dem Oxyde gewonnenen Kupfer 14
5. Versuche mit Elektrolytkupfer der Norddeutschen Affinerie in Hamburg 17
6. Versuche mit aus dem Elektrolytkupfer gewonnenen Kupferoxyd und Kupferoxydul 19

II. Induzierter Magnetismus.

1. Versuchsanordnung 21
2. Bestimmung der Suszeptibilität des Elektrolytkupfers 23
   a) Die Direktionskraft des Aufhängedrahtes . . . 25
   b) Das Magnetfeld und die Windungsfläche einer Spule 27
   c) Die Suszeptibilität 32
3. Angenäherte Bestimmung der Suszeptibilität der verschiedenen Kupferoxyde und des aus ihnen gewonnenen Kupfers 34
4. Einfluss der Oxydbildung und thermischer Behandlung auf die Suszeptibilität 37

III. Zusammenfassung der Resultate 39

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41544701_0006

Einleitung.

In der Abhandlung von Gray und Ross „Über die Herstellung permanenter Magnete aus Proben nahezu reinen Kupfers“[1]) machen die Verfasser selbst auf zwei sich widersprechende Versuche aufmerksam. Aus dem ersten ist die Folgerung zu ziehen, dass sich reines Kupfer durch geeignete thermische Behandlung in einen magnetisierbaren Zustand versetzen lässt. Wird nämlich ein dünnes Blech aus Elektrolytkupfer von 0,003 cm Dicke und 27 und 6,2 cm Kantenlängen, zu einem dünnen Zylinder aufgerollt, bis zu heller Rotglut erhitzt und dann in kaltem Wasser abgelöscht, so zeigt es nach Anwendung eines starken Magnetfeldes — mehr als 3000 Gauss — einen remanenten Magnetismus von der Stärke J = 0,27 C. G. S. Einheiten bei der Temperatur der flüssigen Luft und J = 0,14 C. G. S. Einheiten bei Zimmertemperatur. J ist der sogenannte spezifische Magnetismus, auch Intensität der Magnetisierung genannt, das ist das Verhältnis des magnetischen Moments zum Volumen des Magneten.

Ein zweiter Versuch an einem festen Barren Elektrolytkupfer von 30 gr Gewicht zeigte dagegen keinen remanenten Magnetismus, obgleich der Barren in einem konstanten Magnetfelde von 2200 Gauss aus eisenfreier Kupfersulfatlösung elektrolytisch aufgebaut wurde; auch nach Erhitzen bis zur Rotglut und Ablöschen in kaltem Wasser war kein Magnetismus festzustellen. Nimmt man nun eine Verunreinigung durch beigemischtes Eisen als Ursache der Magnetisierbarkeit des Kupferbleches an, so wären zur Erzeugung eines Magnetismus der angegebenen Stärke 0,0020 „Teile“ hochgradig magnetischen

[1]) J. G. Gray und A. D. Ross. Über die Herstellung permanenter Magnete aus Proben nahezu reinen Kupfers. Physikal. Zeitschr., Bd. X, 1909, Seite 59.

Eisens erforderlich gewesen. Diese einfache Erklärung lehnen die Verfasser aber ab, weil die chemische Analyse sicher weniger als 0,0004 „Teile“ Eisen ergeben hatte. Nun liegt eine andere Vermutung nahe: bei dem Ablöschen des glühenden Kupfers in kaltem Wasser bildet sich notwendigerweise eine Schicht Kupferoxyd; diese Schicht ist im Verhältnis zur Masse des Kupfers bei den dünnen Blechen mit ihrer grossen Oberfläche erheblich grösser als bei dem festen Barren. Wenn also Kupferoxyd sich magnetisieren lässt, so ist der Widerspruch zwischen den beiden Versuchen gelöst.

Auf freundliche Anregung und mit gütiger Unterstützung des Herrn Geheimrat Prof. Dr. E. Dorn habe ich es nun unternommen, den Einfluss der Oxydbildung und im Zusammenhange damit den einer verschiedenen thermischen Behandlung auf den Magnetismus des Kupfers näher zu untersuchen.

I. Permanenter Magnetismus.

1. Versuchsanordnung.

Zur Feststellung des permanenten Magnetismus wurde der an einem empfindlichen Galvanometer mit Spiegelablesung gemessene Strom benutzt, der durch Bewegen eines Magneten in einer Spule induziert wird. Als Messinstrument diente bei den ersten Versuchen ein Panzergalvanometer von Siemens & Halske; da aber die Empfindlichkeit dieser Instrumente ohne feststellbare Ursache sich in ziemlich beträchtlichen Intervallen ändert, so wurde es bald durch ein anderes nach Du Bois-Rubens mit astatischer Nadelanordnung ersetzt, dessen Empfindlichkeit konstant und bei passender Schaltung der vier Spulen grösser war als die des Panzergalvanometers. Ausserdem konnte das Du Bois-Rubens'sche Instrument wenigstens für qualitative Versuche auch als Magnetometer benutzt werden, wodurch die Empfindlichkeit für den Nachweis geringer Magnetismen noch erheblich gesteigert wurde.

Zur Erzeugung des Induktionsstromes dienten zwei grosse Spulen von je 20 cm Höhe und 8 cm innerem Durchmesser; sie wurden übereinander gestellt und mit ihren annähernd gleichen Wicklungen — 1239 und 1150 Windungen — so mit dem Galvanometer verbunden, dass derselbe Strom sie im entgegengesetzten Umdrehungssinne durchfliessen musste. Durch dieses Gegeneinanderschalten wird erreicht, dass Schwankungen der Vertikalintensität des Erdmagnetismus zwei gegeneinander gerichtete Induktionsströme erzeugen, die sich in ihrer Wirkung auf das Galvanometer schwächen. Trotzdem zeigte auch das sonst geschützte Panzergalvanometer während des Verkehrens der elektrischen Strassenbahn keinen festen Nullpunkt an, so dass alle Beobachtungen in der Zeit nach 12 Uhr nachts gemacht werden mussten.

In das Innere der beiden Spulen hing an einer Schnur der zu untersuchende Körper hinein, entweder in Stabform oder als Pulver in einem Glasrohr; die Schnur ging über eine in Kugellagern laufende Rolle in die Hand des Beobachters, und zwei Anschläge sorgten dafür, dass die Bewegung nur von Spulenmitte zu Spulenmitte möglich war. Die Aufwärtsbewegung geschah durch Ziehen an der Schnur, die Abwärtsbewegung durch die eigene Schwere des zu untersuchenden Körpers; wo diese nicht ausreichte — wie bei den Vergleichsperlnadeln — wurde ein kleines Bleigewicht zu Hilfe genommen; ein aus Karton gerollter Zylinder verengerte den Innenraum der Spulen soweit, dass Pendelbewegungen des Körpers ausgeschlossen waren; frei liegende Kontakte mussten zur Vermeidung von Thermoströmen mit Watte geschützt werden.

Gemessen wurde der durch eine Bewegung des zu untersuchenden Körpers von Spulenmitte zu Spulenmitte hervorgerufene erste Ausschlag des Galvanometers, der dem magnetischen Moment des Körpers proportional ist. Der Einfluss der Vertikalintensität des Erdmagnetismus durch den im zu untersuchenden Gegenstande induzierten Magnetismus wurde durch Umkehren des Gegenstandes eliminiert: die Verstärkung des vorhandenen Magnetismus in der einen Lage ist gleich der Schwächung in der umgekehrten Lage, das Mittel aus beiden Werten ist also frei von dem Einfluss des Erdmagnetismus.

---

2. Bestimmung des Momentes der Vergleichsperlnadeln.

Um die Galvanometerausschläge und damit die magnetischen Momente der einzelnen Stoffe auf absolutes Mass zurückführen zu können, musste für irgend einen Vergleichskörper das Moment bestimmt werden. Es wurden zwei unter dem Namen Perlnadeln im Handel befindliche, sehr feine Stahlnadeln dazu benutzt, die durch Streichen mit einem permanenten Magneten magnetisiert waren. Da die Beobachtungen abwechselnd mit beiden Perlnadeln gemacht wurden, hätte eine Änderung des magnetischen Momentes einer der beiden Nadeln während der Dauer der Versuche sich durch die Verschiedenheit der Resultate bemerkbar

machen müssen; in einigen Fällen wurde statt der zweiten Nadel eine schon bekannte Substanz benutzt. Eine Änderung der Momente der Nadeln hat sich jedoch nicht feststellen lassen.

Die Bestimmung des Magnetismus erfolgte nach der von Gauss angegebenen Methode [1]) zur Ermittlung der Horizontalintensität des Erdmagnetismus; es wurde das Verhältnis $\frac{M}{H}$ des Nadelmomentes zur Horizontalintensität des Erdmagnetismus durch die Ablenkung einer Magnetometernadel unter der Wirkung der Perlnadel aus bekannten Entfernungen ermittelt. Daraus lässt sich das Nadelmoment berechnen, wenn man für die Horizontalintensität des Erdmagnetismus den für das hiesige Institut gültigen Wert $H = 0{,}195$ Gauss einsetzt.

Der Apparat wurde improvisiert aus einem Magnetometer mit einem Ringmagneten in einem Kupferdämpfer und zwei Glasmassstäben, die mit Klebwachs auf Holzklötzen in der richtigen Lage befestigt wurden. Da die Ablesung mit Fernrohr, Spiegel und Skala geschah, so waren noch sehr kleine Ausschläge messbar; infolgedessen konnten die Entfernungen der Perlnadeln von der Mitte des Magnetometers auch noch so gross genommen werden, dass der kleinere Abstand r grösser als die vierfache Länge der Perlnadel war und das Verhältnis der beiden Entfernungen r'/r etwa 1,4 betrug. Die verschiedenen der Berechnung zu Grunde liegenden Formeln sind folgende:

Für die erste Hauptlage

$$1.\quad \frac{M}{H} = \frac{1}{2}(1+\delta)\,\frac{r_1^{\,5}\operatorname{tg}\varphi_1 - r_2^{\,5}\operatorname{tg}\varphi_2}{r_1^{\,2} - r_2^{\,2}}$$

für die zweite Hauptlage

$$2.\quad \frac{M}{H} = (1+\delta)\,\frac{r_1^{\,5}\operatorname{tg}\varphi_1 - r_2^{\,5}\operatorname{tg}\varphi_2}{r_1^{\,2} - r_2^{\,2}}$$

und (wenn der Polabstand als bekannt vorausgesetzt wird) für die erste Hauptlage

$$3.\quad \frac{M}{H} = \frac{1}{2}(1+\delta)\,\frac{r^3\operatorname{tg}\varphi}{1+\eta/r^2}\,;\quad \eta = \frac{1}{2}L^2 - \frac{3}{4}l^2$$

[1]) F. Kohlrausch. Lehrbuch der pr. Physik. XI. Aufl. 1910, S. 372.

Darin bedeuten:

r, r_1, r_2 die Abstände der Mitte der Perlnadel von der Mitte des Magnetometers,

φ, φ_1, φ_2 die dazugehörigen Ablenkungen,

δ das Torsionsverhältnis des Magnetometers,

L der Polabstand der Perlnadeln, gleich $^5/_6$ ihrer Länge,

l der Polabstand des Ringmagneten im Magnetometer, gleich $0{,}88 \cdot d$ [1]), wenn d der äussere Durchmesser des Ringes ist.

In der folgenden Übersicht sind die Beobachtungen — immer Mittelwerte aus mehreren Ablesungen — und die Resultate für $\frac{M}{H}$ zusammengestellt; in der ersten Spalte „Formel" weisen die Ziffern auf die Seite 11 angeführten Formeln hin, mit denen die Rechnung durchgeführt ist. Die zweite Spalte gibt die Entfernung der Mitte der Perlnadel von der Mitte des Magnetometers an; sie wurde in der Weise ermittelt, dass die Entfernung der beiden Punkte gemessen wurde, die die Perlnadelmitte in zwei zum Magnetometer symmetrischen Lagen einnimmt; die Hälfte dieses Abstandes ist die gesuchte Entfernung. Die dritte Spalte enthält die Differenz der Magnetometereinstellungen für die in der zugehörigen Entfernung aufgelegte Perlnadel in der einen Lage — z. B. Spitze zum Magnetometer hin — und in der um 180^0 gedrehten — d. h. Öhr zum Magnetometer hin. Der Durchmesser des Ringmagneten beträgt $d = 1{,}930$ cm.

Für die Perlnadel I wurden ausserdem folgende Werte bestimmt:

Länge $L' = 2{,}93$ cm

Gewicht $= 0{,}021_2$ gr

Spezifisches Gewicht $= 7{,}9$.

Ferner:

das Torsionsverhältnis des Magnetometers $\delta = 0{,}0005_{25}$

und der Abstand der Fernrohrskala $= 3632$ Skalenteile.

---

[1]) F. Kohlrausch. Über den Polabstand eines Magneten. Wiedem. Ann. Bd. 22 (1884) Seite 415.

Tabelle 1.

Formel	Abstand der Perlnadel in cm	Ablenkung in Skalenteilen	$\frac{M}{H}$
1	$r_1 = 17{,}15_0$	$40{,}8_8$	7,044
	$r_2 = 12{,}15_0$	$115{,}7_5$	
2	$r_1 = 17{,}89_5$	$18{,}0_3$	7,118
	$r_2 = 12{,}89_5$	$48{,}2_0$	
3	$r = 14{,}15_0$	$71{,}9_3$	6,979
3	$r = 10{,}15_0$	$197{,}8_3$	7,050

Im Mittel ergibt sich also:

$$\frac{M}{H} = 7{,}05 \pm 0{,}07 \text{ cm}^3.$$

Dann wird

$$M = 1{,}375 \text{ (C. G. S.)}$$
$$J = 509 \text{ (C. G. S.)}.$$

Für Perlnadel II wurde bestimmt:

Länge $L' = 2{,}07$ cm
Gewicht $= 0{,}016_5$ gr
Spezifisches Gewicht $= 7{,}9$.

Ferner:

Torsionsverhältnis des Magnetometers $\delta = 0{,}0005_{37}$
und der Abstand der Fernrohrskala $= 3718$ Skalenteile.

Tabelle 2.

Formel	Abstand der Perlnadel in cm	Ablenkung in Skalenteilen	$\frac{M}{H}$
1	$r_1 = 18{,}88_0$	$22{,}3_8$	5,115
	$r_2 = 12{,}88_0$	$70{,}0_0$	
3	$r = 9{,}88_0$	$154{,}4_0$	5,041

Im Mittel ergibt sich daraus:

$$\frac{M}{H} = 5{,}08 \pm 0{,}04 \text{ cm}^2.$$

Dann wird

$$M = 0{,}991 \text{ (C. G. S.)}$$
$$J = 472 \text{ (C. G. S.)}.$$

---

3. Das Magnetfeld.

Zur Magnetisierung der zu untersuchenden Stoffe wurde der grosse Elektromagnet des Instituts verwendet; ein U-förmig gebogener Eisenkern trägt an seinen geraden Schenkeln die Wicklung und an den freien Enden zwei konisch zugespitzte, sonst im Querschnitt quadratische Polschuhe. Da die Substanzen in Stäben von 12 cm Länge oder als Pulver in ebenso langen Glasröhren zur Untersuchung gebracht wurden, mussten die Polschuhe entsprechend weit auseinander gezogen werden; ferner wurden, um gleichzeitig mehrere Proben magnetisieren zu können, nicht die Spitzen der Polschuhe, sondern ihre parallelepipedischen Enden einander zugekehrt. Trotzdem betrug die Feldstärke etwas über 3000 Gauss, wie die Bestimmung nach einer im zweiten Teil dargelegten Methode an drei symmetrischen Stellungen im Abstande von etwa 3 cm von einander und von den Polschuhen ergab.

---

4. Versuche mit Kupferoxyd der Firmen Merck und Kahlbaum und dem aus dem Oxyde gewonnenen Kupfer.

Es wurden zunächst zwei von den Firmen Merck und Kahlbaum bezogene Proben Kupferoxyd untersucht; die Substanzen waren als eisenfrei geliefert worden, und auch eine qualitative chemische Untersuchung ergab mit der bekannten Berliner-Blau-Reaktion kein Eisen. Die empfindlichere Rhodanammoniumprobe konnte wegen der Anwesenheit von Kupfer nicht

ausgeführt werden. Trotzdem sind beide Präparate nicht rein gewesen; denn reines Kupferoxyd muss nach der Reduktion zu metallischem Kupfer ein diamagnetisches Kupfer ergeben, diese beiden Proben lieferten aber ein stark paramagnetisches Reduktionsprodukt.

Die Reduktion wurde in der Weise vorgenommen, dass das Oxyd in einem sogenannten Verbrennungsofen geglüht wurde, während ein mässiger Wasserstoffstrom aus einer Stahlflasche darüber hinwegstrich; nach dem Erkalten im Wasserstoffstrome wurde das Verbrennungsrohr an beiden Seiten geschlossen und abgeschmolzen, so dass das Kupfer bis unmittelbar vor dem Magnetisieren sich in einer Wasserstoffatmosphäre befand. Auch Proben, die im zugeschmolzenen Rohr magnetisiert und untersucht wurden, lieferten dasselbe Resultat.

Die Untersuchung geschah in folgender Weise: die in Pulverform vorliegende Substanz wurde in ein Glasrohr von etwa 1 cm innerem Durchmesser — bei den ersten Versuchen in ein Messingrohr — gefüllt und so magnetisiert. Sei p ihr Gewicht in Gramm und bewirke das gefüllte Rohr bei seiner Bewegung in den beiden erwähnten Spulen einen Ausschlag von α Skalenteilen, die Perlnadel einen solchen von β Skalenteilen, und seien endlich $M_\varkappa$ und M die magnetischen Momente der Substanz und der Perlnadel, dann besteht die Proportion:

$$M_\varkappa : M = \alpha : \beta$$

also

$$M_\varkappa = M \cdot \frac{\alpha}{\beta}$$

Dann wird das Moment der Volumeneinheit:

$$J = M \cdot \frac{\alpha}{\beta} \cdot \frac{\sigma}{p}$$

wenn σ das spezifische Gewicht der Substanz bezeichnet. Hierin gibt $\frac{p}{\sigma}$ das Volumen der kompakten Masse Kupferoxyd an. Nach dieser Formel sind die in der Tabelle 3 zusammengestellten Werte für J berechnet. Die erste Spalte charakterisiert die Substanz; dabei ist das aus dem Kupferoxyd der betreffenden Firma durch Glühen im Wasserstoffstrome hergestellte Kupfer kurz mit Kupfer

Merck bezw. Kahlbaum bezeichnet. Zu Spalte 3 ist zu bemerken, dass die verwendeten Glasröhren, für sich allein magnetisiert, keinen Ausschlag gaben; der ganz geringe des Messingrohres ist bei dem angegebenen Wert bereits in Abzug gebracht. Spalte 4 gibt die Nummer der Perlnadel an. Bei dem Ausschlag in Spalte 5, den die Perlnadel hervorruft, waren wegen der sehr schnellen Umkehr zehntel Skalenteile nicht mit Sicherheit zu schätzen. Alle Werte sind wieder Mittelwerte aus mehreren Ablesungen. Das der Berechnung von J zugrunde liegende spezifische Gewicht von 6,40 für Kupferoxyd und 8,92 für Kupfer ist den Tabellen von Landolt und Börnstein [1]) entnommen.

Tabelle 3.

Substanz	Gewicht der Substanz in gr	Ausschlag der Substanz in Skt.	Nummer d. Perln.	Ausschlag d. Perlnadel in Skt.	J (C. G. S.)
Kupferoxyd Merck	81,6	$2{,}9_9$	I	154,1	0,0021
	78,3	$2{,}9_4$	I	162,8	0,0020
	57,0	$1{,}7_0$	I	131,7	0,0020
			II	90,4	0,0021
Kupferoxyd Kahlbaum	21,3	$2{,}1_5$	I	69,6	0,0128
			II	47,9	0,0134
Kupferoxyd Kahlbaum	20,0	$6{,}5_5$	II	138,4	0,0150
Kupferoxyd Merck	32,8	$1{,}4_6$			0,0020
Kupferoxyd Kahlbaum	17,04	$3{,}8_0$	II	94,8	0,0150
Kupfer Merck	16,41	$9{,}9_3$			0,0564
Kupfer Kahlbaum	10,23	$3{,}0_5$			0,0278

Daraus ergeben sich für die Oxyde die Mittelwerte:

Kupferoxyd Merck J = 0,0020 (C. G. S.)

Kupferoxyd Kahlb. J = 0,0140 (C. G. S.)

[1]) Landolt und Börnstein. Physik.-chem. Tabellen. III. Auflage 1905. Seite 239 und 226.

Zu beachten ist die auffällige Zunahme der Magnetisierung durch die Reduktion zu metallischem Kupfer, die namentlich bei der Merckschen Probe sehr erheblich ist: dieselbe Erscheinung zeigt sich auch beim induzierten Magnetismus. Da als Verunreinigung nur Eisen in Frage kommt, so lässt sich die Tatsache in beiden Fällen durch folgende Annahme erklären: in dem Kupferoxyd liegt auch das Eisen als nur schwach magnetisierbares Eisenoxyd vor; durch das Glühen im Wasserstoffstrome reduziert sich das Eisenoxyd zu metallischem Eisen, dessen Einfluss auf den Magnetismus ein erheblich grösserer ist. Unwahrscheinlicher ist die von Gray und Ross ausgesprochene Vermutung, dass das Kupfer — beim Glühen — mit den minimalen Mengen Eisen eine Verbindung eingeht, die stärker magnetisch ist, als dem Eisengehalt entspricht.

Die Versuche 1 bis 6 der Tabelle 3 sind mit dem Panzergalvanometer angestellt. An der Veränderlichkeit der mit derselben Perlnadel erhaltenen Ausschläge zeigt sich die Unbeständigkeit des Panzergalvanometers; dabei sind Versuche, bei denen sich mit dem Kupferoxyd überhaupt kein Ausschlag hervorrufen liess, garnicht angegeben.

Zu den Ausschlägen mit dem Du Bois-Rubens'schen Instrument, mit dem der Rest der Beobachtungen angestellt worden ist, sei bemerkt, dass zwischen den Versuchen 7 bis 8 und 9 bis 11 ein Zeitraum von über einem halben Jahre liegt und der Apparat an einer anderen Stelle neu aufgebaut worden war; eine Gleichheit der Ausschläge ist also garnicht zu erwarten.

---

5. Versuche mit Elektrolytkupfer der Norddeutschen Affinerie in Hamburg.

Die folgenden Versuche wurden an parallelepipedischen Stäben aus Elektrolytkupfer von etwa 12, 1 und 0,5 cm Kantenlängen vorgenommen; die Stäbe waren aus grossen Platten von 0,5 cm Stärke herausgesägt und durch Abätzen mit heisser, verdünnter Schwefelsäure von den etwa durch die Bearbeitung mit

der Stahlsäge herangebrachten Spuren von Eisen befreit worden. Als Beweis ihrer Reinheit kann der für die Suszeptibilität bestimmte Wert von

$$\varkappa . 10^6 = -0{,}68$$

gelten, der mit dem von St. Meyer[1]) angegebenen gut übereinstimmt.

Die Proben wurden der verschiedensten thermischen Behandlung unterworfen. Ein Stab wurde unbehandelt magnetisiert, ein anderer im elektrischen Widerstandsofen auf helle Rotglut erhitzt, in kaltem Wasser abgelöscht und dann magnetisiert, ein dritter nach dem Glühen langsam abgekühlt usw., es liess sich aber in keinem Falle die geringste Spur permanenten Magnetismus nachweisen. Auch stärkeres oder schwächeres Glühen führte zu keinem positiven Resultat. Schliesslich wurde durch Zusammennieten zweier etwas breiteren Stücke ein stärkerer Stab von 118,7 gr Gewicht angefertigt. Dieser Stab wurde nach dem Glühen und Ablöschen in kaltem Wasser in ein Gefäss mit flüssiger Luft gebracht und in diesem Gefässe der Wirkung des Magnetfeldes ausgesetzt; auch die Untersuchung geschah bei der Temperatur der flüssigen Luft; es liess sich aber auch hier kein permanenter Magnetismus nachweisen. Langsames Abkühlen, Untersuchen des in flüssiger Luft magnetisierten Stabes bei Zimmertemperatur und umgekehrt, Magnetisieren bei Zimmertemperatur und Untersuchen in flüssiger Luft änderte an dem negativen Resultate nichts.

Zur Beurteilung der Empfindlichkeit der Anordnung sei bemerkt, dass sich eine Remanenz von $J = 0{,}00007$ (C. G. S.) für Kupfer durch einen Ausschlag von einem zehntel Skalenteil angezeigt hätte. Bei der Anwendung des Du Bois-Rubens'schen Galvanometers als Magnetometer konnte der Ausschlag für die mit magnetisiertem Kupferoxyd gefüllten Röhren sogar noch auf das 16-fache erhöht werden, womit die oben erwähnte obere Grenze für die Magnetisierung des Kupfers entsprechend weiter herabgesetzt wird, da der Kupferstab auch hier keinen Ausschlag

[1]) St. Meyer, Magnetische Eigenschaften der Elemente. Wiedem. Ann. Bd. 68. 1899. Seite 330.

bewirkte. Mit den Oxydröhren wurde die Ablenkung in der Weise hervorgerufen, dass das Rohr in senkrechter Stellung bis unmittelbar an die beiden astatisch aufgehängten Magnetsysteme herangeschoben wurde, sodass seine beiden Enden sich etwa in gleicher Höhe mit den oberen und unteren Magnetsystemen befanden.

6. Versuche mit aus Elektrolytkupfer gewonnenem Kupferoxyd und Kupferoxydul.

Nachdem alle Versuche, eine Wirkung des auf den Kupferstäben zum Teil in ziemlich dicker Schicht haftenden Kupferoxyds auf den Magnetismus der Stäbe festzustellen, gleichfalls gescheitert waren, und nachdem insbesondere sich die Verunreinigung des käuflichen Kupferoxyds ergeben hatte, wurde dazu übergegangen, das Kupferoxyd aus dem vorhandenen Elektrolytkupfer selbst darzustellen. Zu dem Zwecke wurde die im Handel befindliche konzentrierte Salpetersäure durch Destillation eines Gemisches aus gleichen Teilen konzentrierter Schwefelsäure und Salpetersäure gereinigt und in der nunmehr eisenfreien, rauchenden Salpetersäure eine Probe Elektrolytkupfer gelöst, deren Diamagnetismus vorher festgestellt worden war. Die zur Fällung nötige Kalilauge wurde durch Auflösen von festem Kaliumhydroxyd in Wasser gewonnen; übrigens sind auch die Hydroxydstäbe stark diamagnetisch. Durch tropfenweises Versetzen der Kupfernitratlösung mit Kalilauge in der Siedehitze wurde das Kupferoxyd gefällt, bis zum Verschwinden der alkalischen Reaktion ausgewaschen und im Porzellantiegel geglüht. Als Beweis der Reinheit diente wieder der Diamagnetismus des aus diesem Kupferoxyd durch Reduktion gewonnenen Kupfers.

Es zeigte sich nun, dass dies reine Kupferoxyd ebenso wenig permanent zu magnetisieren ist wie das Elektrolytkupfer; dasselbe Resultat ergab sich bei dem aus Elektrolytkupfer hergestellten Kupferoxydul. Die Darstellung geschah in der bekannten Weise, dass eine eisenfreie Kupfersulfatlösung nach

Zusatz von Traubenzucker in der Siedehitze mit Kalilauge versetzt wurde.

Hiermit ist die eingangs erwähnte Vermutung, dass die Oxydbildung bei dem scheinbaren permanenten Magnetismus des Kupfers irgend eine Rolle spiele, als falsch nachgewiesen; der von Gray und Ross beobachtete Magnetismus kann also nur auf Verunreinigungen, d. h. Eisen, beruht haben.

II. Induzierter Magnetismus.

1. Versuchsanordnung.

Zur Untersuchung des Einflusses der Oxydbildung und thermischer Behandlung auf den induzierten Magnetismus diente ein Torsionsapparat, der im wesentlichen nach dem Prinzip des von G. Wiedemann[1]) angegebenen gebaut ist. Die von Herrn Dr. Tänzler[2]) zusammengestellte Einrichtung sei im folgenden zugleich mit der zur Untersuchung von festen Körpern nötigen Änderung wiedergegeben; die Anregung zu der Änderung hat Herr Dr. Bernstein[3]) im Anhange seiner Dissertation gegeben.

Zwei Holzkonsolen sind etwa 1,20 m übereinander in die Zimmerwand eingegipst. Auf der oberen Konsole liegt der Torsionskopf, das ist eine flache Trommel aus Messing, die horizontal drehbar auf einer Metallscheibe gelagert ist. Diese Trommel kann mittelst einer Schraube, die durch Schnurzüge vom entfernt sitzenden Beobachter bewegt werden kann, um sehr kleine Winkel gedreht werden. In der Mitte der Trommel ist der aus Platiniridium hartgezogene, 77,35 cm lange und 0,0240 cm starke Torsionsdraht befestigt, dessen unteres Ende einen T-Haken trägt, an dem mit einem Doppel-Y-Haken ein aus Elektrolytkupfer hergestelltes Kreuz hängt. An dem nach vorn gewandten Ende des horizontalen Kreuzteiles ist senkrecht nach unten ein Arm, gleichfalls aus Elektrolytkupfer, befestigt, der an seinem unteren Ende eine Vorrichtung zum Einklemmen der zu untersuchenden

---

[1]) G. Wiedemann. Magnetische Untersuchungen. Pogg. Ann. Bd. 126 (1865) Seite 1.

[2]) P. Tänzler. Das magnetische Verhalten von Luft, Argon und Helium zu Sauerstoff. Drude Ann. Bd. 24 (1907) Seite 931.

[3]) R. Bernstein. Untersuchungen über den Magnetismus einiger Gase und Dämpfe. Inaug.-Diss. Halle 1909.

Stäbe enthält. An dem hinteren Ende des horizontalen Kreuzteiles ist ein Gegengewicht aus Elektrolytkupfer angebracht; der durch ein Loch im Tisch hindurchgehende Schaft des Kreuzes trägt unten scheibenförmige Belastungsgewichte aus Blei und vier Dämpferflügel, die in Paraffinum liquidum tauchen. In gleicher Höhe mit der Befestigungsvorrichtung für die zu untersuchenden Stäbe liegt der Elektromagnet mit würfelförmigen Polschuhen und in diesen verschiebbaren Bolzen von kreisförmigen Querschnitt, deren einander zugekehrte Enden so abgefräst sind, dass die Polflächen Rechtecke von 4 cm horizontaler und 1,5 cm vertikaler Seitenlänge bilden. Dem ganzen Magneten ist eine solche Lage gegeben, dass seine Symmetrieachse, horizontal verlaufend, durch die Längsachse des zu untersuchenden Stabes hindurchgeht und dabei den Kreis tangiert, den das im Magnetfeld befindliche Stabende bei einer Drehung des Kreuzes beschreibt. Die Grösse der Drehung kann an einem am Schafte des Kreuzes angebrachten Spiegel mit Fernrohr und Skala abgelesen werden.

Um die beweglichen Teile des Apparats gegen Luftströmungen zu schützen, sind sie in einem Pappkasten eingeschlossen, dessen eine Wand an den Polschuhen abschliesst, während die gegenüberliegende eine Tür bildet, durch die hindurch die Auswechselung der Stäbe vorgenommen werden kann. Die mit Goldpapier beklebte Aussenseite des Pappkastens, wie auch der Magnetkern und bei offenem Stromkreis die Wicklung sind zur Erde abgeleitet. In dem Stromkreis ist ein Regulierwiderstand und ein Amperemeter eingeschaltet. Von der Aufstellung eines besonderen Magnetometers zur Beobachtung der Feldstärke, wie es Herr Dr. Moehle[1]) angewendet hatte, wurde abgesehen, da das Instrument während der ganzen Dauer der Moehleschen Untersuchungen seine Einstellung nicht geändert hatte, und die genaue Einregulierung der Stromstärke die Konstanz des Magnetfeldes gewährleistet.

Die magnetische Kompensation des an sich schwach paramagnetischen Apparates geschah durch eine Wismutkugel, die mit Klebwachs an dem vertikalen Arm in passender Höhe be-

[1]) H. Moehle. Untersuchungen über den Magnetismus einiger Kobalt- und Nickelsalze. Inaug.-Diss. Halle 1910.

festigt wurde. Die Einstellung war so beschaffen, dass der Apparat allein ohne Magnetfeld dieselbe Nullstellung zeigte, wie nach Erregen des Magneten.

2. Bestimmung der Suszeptibilität des Elektrolytkupfers.

Die Einrichtung zum Festklemmen massiver Stäbe war, wie oben erwähnt, zu dem Zwecke angebracht, den Apparat, der bereits zur Bestimmung der Magnetismen von Gasen und Flüssigkeiten gedient hatte, auch für feste Körper brauchbar zu gestalten. Zwischen die einander parallel gegenüberstehenden, länglich rechteckigen Endflächen der Polschuhe reicht der zu untersuchende Stab von ebenfalls rechteckigem Querschnitt so weit hinein, dass die eine Endfläche ganz innerhalb des homogenen Magnetfeldes, die andere möglichst weit ausserhalb liegt. Der Stab ist so an der Torsionswage befestigt, dass seine Längsachse tangential zu dem Kreise verläuft, auf dem sich bei der Torsion das im Magnetfeld befindliche Ende bewegt. Diese Anordnung stellt eine Kombination der Faradayschen[1]) Torsionsanordnung mit der Quinckeschen[2]) Steighöhenmethode dar.

Die tordierende Kraft ist dem Querschnitte des Stabes proportional; bezeichnet man ferner die Feldstärke am inneren Ende des Stabes mit $\mathfrak{H}$ und am äusseren mit $\mathfrak{H}_1$, so ist der magnetische Druck P auf die innere Endfläche

$$P = C \cdot \mathfrak{H}^2 - C_1 \mathfrak{H}_1^{\,2} + K,$$

wobei C und C_1 für dieselbe Substanz Konstanten sind und K die magnetische Wirkung auf den Apparat allein bedeutet. Durch entsprechende Länge der Stäbe kann man es erreichen, dass $\mathfrak{H}_1^{\,2}$ gegen $\mathfrak{H}^2$ vernachlässigt werden darf. Da ferner die Torsion nicht während ihres Bestehens abgelesen wird, sondern der Wagebalken in die ohne Magnetfeld vorhandene Ruhelage zurücktordiert und dann die Ablenkung bestimmt wird, die nach Auf-

[1]) H. Faraday. Beobachtungen über den Magnetismus. Pogg. Ann. Bd. 88 (1855) Seite 557.

[2]) G. Quincke. Der magnetische Druck der Flüssigkeiten und Gase. Wiedem. Ann. Bd. 34 (1888) Seite 401.

heben des Feldes der vorher erzeugten Torsion entsprechend sich einstellt, so bleibt der Apparat während der Dauer des Magnetfeldes in der Nullstellung, und die magnetische Kompensation braucht nur für diese eine Stellung ausgeführt zu werden; damit kann, unter der statthaften Voraussetzung, dass die Einbringung der zu untersuchenden Stäbe den Kraftlinienverlauf des Magnetfeldes nicht wesentlich ändert, auch K zum Verschwinden gebracht werden.

Bezeichnet man mit $\varkappa$ die Suszeptibilität der Substanz, das ist das Verhältnis der Magnetisierung J eines Körperelements zu der auf dieses wirkenden magnetisierenden Intensität $\mathfrak{H}$, und mit Q den Querschnitt des Stabes, so ist der magnetische Druck auf den Stabquerschnitt

$$P = \frac{\varkappa}{2} \cdot \mathfrak{H}^2 \cdot Q \quad ^1)$$

Für $\mathfrak{H}$ kann bei schwach magnetischen Substanzen die Feldstärke in Abwesenheit der Substanz genommen werden. Dem Druck auf den Stabquerschnitt hält die Torsionselastizität des Aufhängedrahtes das Gleichgewicht; das wirksame Drehmoment ist zunächst $M = P \cdot h$, wenn h die Länge des Hebelarmes der Drehwage bedeutet. Andererseits ist $M = D \cdot \varphi$, worin D die Direktionskraft des Platiniridiumdrahtes und φ die Ablenkung aus der Gleichgewichtslage in absolutem Winkelmass bedeuten. Das ergibt für die Suszeptibilität

$$\varkappa = \frac{2 \cdot D \cdot \varphi}{h \cdot \mathfrak{H}^2 \cdot Q}.$$

Da aber die Direktionskraft bei einer Drahtlänge $l = 76{,}75$ cm bestimmt wurde, während bei der Ablenkung durch das Magnetfeld infolge der Verschiedenheit der Befestigungen der Torsionsscheibe und des Kupferkreuzes die Drahtlänge $l_1 = 77{,}35$ cm betrug, so ist noch ein Korrektionsfaktor $\frac{l}{l_1}$ anzubringen.

Der Winkel φ wird bei Ablesung mit Fernrohr, Spiegel und Skala aus $\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{n}{s}$ gefunden, wenn n der Ausschlag und

[1]) Winkelmann. Handbuch der Physik, Bd. V, Auflage II. 1908. Seite 117 und 252.

s der Abstand der Fernrohrskala in Skalenteilen ist. Einer besonderen Bestimmung bedürfen in der Formel für die Suszeptibilität $\varkappa$ noch die Direktionskraft und das Magnetfeld.

a) Bestimmung der Direktionskraft.

Die Direktionskraft hängt mit dem Trägheitsmomente K und der einfachen Schwingungsdauer T des Systems durch die Beziehung zusammen

$$T = \pi \sqrt{\frac{K}{D}}.$$

Das Trägheitsmoment wurde nach Gauss[1]) aus der Schwingungsdauer mit und ohne Zusatzbelastung von geometrisch berechenbarem Trägheitsmoment ermittelt. Anstelle des Kreuzes aus Elektrolytkupfer wurde eine abgedrehte Scheibe an dem Torsionsdraht befestigt und die Dauer der Torsionsschwingungen gemessen. Diese Messung geschah in der bekannten Weise, dass nicht die Umkehrzeiten, sondern die genauer festzustellenden Durchgangszeiten durch die Mittellage ermittelt wurden. Da ferner die Schwingungsdauer zu kurz war, um alle Durchgänge notieren zu können, so wurden von 28 Durchgängen je die 1., 4., 7. usw. ermittelt. Durch Kombination von 1 und 28, 4 und 25 usw. erhält man den Zeitpunkt eines Durchganges äusserst genau; durch zwei solche Zeitpunkte und die Anzahl der zwischen ihnen liegenden Schwingungen ist die Schwingungsdauer gegeben. Die Anzahl der Schwingungen wurde aus einem Näherungswerte abgeleitet, wobei zur Sicherheit die Beobachtungen immer mit derselben Schwingungsrichtung begonnen wurden; dann muss die Anzahl eine gerade sein. Die Reduktion der Schwingungsdauer auf unendlich kleine Amplitude ist bei einer durch Torsionselastizität getriebenen Masse nicht erforderlich.

Die Zusatzbelastungen bestanden aus zwei abgedrehten Scheiben, die zum Zwecke der Befestigung in der Mitte mit einer zylindrischen Durchbohrung versehen waren. Für einen Hohlzylinder der Masse m gr und mit den Halbmessern r_0 und r_1 in cm ist das auf die Achse bezogene Trägheitsmoment

$$K = \frac{1}{2} m (r_0^2 + r_1^2) \text{ (C. G. S).}$$

[1]) F. Kohlrausch, Lehrbuch der prakt. Physik. XI. Aufl. 1910. Seite 114.

Das ergibt bei den Dimensionen der Scheiben

I. $r_0 = 0{,}20_0$ cm
$r_1 = 3{,}00_5$ „
$m = 245{,}55$ gr

II. $r_0 = 0{,}20_2$ cm
$r_1 = 3{,}00_5$ „
$m = 232{,}35$ gr

die Trägheitsmomente:

Scheibe I: $K' = 1113{,}62$ (C. G. S.)
„ II: $K'' = 1053{,}85$ „

Die Werte für die Schwingungsdauern sind folgende:
für die Grundscheibe

$$T_0 = 5{,}179_4 \text{ sek.}$$

für die Grundscheibe und Zusatzscheibe I

$$T_1 = 7{,}379_3 \text{ sek.}$$

für die Grundscheibe und beide Zusatzscheiben I und II

$$T_2 = 8{,}984_0 \text{ sek.}$$

Sei nun K^i das Trägheitsmoment der Zusatzbelastung und T_i die zugehörige Schwingungsdauer, so gilt, da die Trägheitsmomente proportional dem Quadrate der Schwingungsdauern sind, die Beziehung

$$K : K + K^i = T^2 : T_i^2$$

oder

$$\frac{K}{T^2} = \frac{K^i}{T_i^2 - T^2}.$$

Aus den vorhandenen Beobachtungen lassen sich drei Werte für $\frac{K}{T^2}$ ermitteln.

Zunächst liefert Scheibe I als Zusatzbelastung zur Grundscheibe

$$\frac{K_0}{T_0^2} = \frac{K'}{T_1^2 - T_0^2} = 40{,}308 \text{ (C. G. S.)}.$$

Ferner kann man Scheibe I und II als Zusatzbelastung zur Grundscheibe ansehen, das gibt

$$\frac{K_0}{T_0^2} = \frac{K' + K''}{T_2^2 - T_0^2} = 40{,}223 \text{ (C. G. S.)}.$$

Schliesslich kann Scheibe II als Zusatzbelastung zu den beiden anderen Scheiben angesehen werden, das ergibt

$$\frac{K_1}{T_1^2} = \frac{K''}{T_2^2 - T_1^2} = 40{,}134 \text{ (C. G. S.)}.$$

Im Mittel ist also

$$\frac{K}{T^2} = 40{,}222 \text{ (C. G. S.)}.$$

Das gibt für D den Wert:

$$D = 396{,}98 \text{ (C. G. S.)}.$$

Da nun Direktionskraft und Torsionsmodul durch die Beziehung

$$[F] = \frac{2 \cdot D \cdot l}{\pi \cdot r^4}$$

zusammenhängen, so ergibt sich aus dem obigen sofort der noch nicht bekannte Torsionsmodul für Platiniridium. Die Drahtlänge l betrug 76,75 cm und der Drahtradius r wurde mit einem Hommelschen Schraubendickenmesser zu $r = 0{,}012_0$ cm bestimmt. Hiernach wird

$$[F] = 9{,}354 \cdot 10^{11} \text{ (C. G. S.)}$$

$$\text{oder } F = 9535 \text{ kg Gew. mm}^{-2}.$$

b) Bestimmung des Magnetfeldes und der Windungsfläche einer Spule.

Die Magnetfeldbestimmung wurde nach der Methode von Verdet[1]) ausgeführt; ein Drahtröllchen von der Windungsfläche w, dessen Ebene senkrecht zu den Kraftlinien steht, wird plötzlich aus dem Magnetfelde herausgezogen und erzeugt einen ersten Galvanometerausschlag α. Dann ist das Produkt der Feldstärke $\mathfrak{H}$ in die Windungsfläche

$$\mathfrak{H} \cdot w = P \cdot \alpha,$$

worin P eine vom Galvanometer und dem Widerstande des Strom-

[1]) F. Kohlrausch, Lehrbuch der pr. Physik, XI. Aufl. 1910. S. 518.

kreises abhängige Konstante ist. Befindet sich nun in demselben Stromkreis ein Erdinduktor, und erzeugt dessen Drehung um 180^0 um die Vertikalachse einen ersten Galvanometerausschlag β, so ist

$$2 . H . W = P . \beta,$$

wenn H die Horizontalintensität des Erdmagnetismus und W die Windungsfläche des Erdinduktors bedeuten. Daraus ergibt sich

$$\mathfrak{H} = \frac{2 . H . W . \alpha}{w . \beta}.$$

Da die Windungsfläche des Erdinduktors und die Horizontalintensität des Erdmagnetismus bekannt sind, bleibt noch die Windungsfläche der Hilfsspule zu bestimmen. Dies geschah durch magnetische Fernwirkung nach einer von F. Kohlrausch[1]) angegebenen Methode. Derselbe Strom durchfliesst die Spule, eine Spiegeltangentenbussole und einen Regulierwiderstand. Zwei Viernäpfe sorgen dafür, dass sich einmal der gesamte Strom, das andere Mal nur der Teil wenden lässt, der die Tangentenbussole durchfliesst. Durch den zweiten Kommutator wird erreicht, dass sich die Wirkungen von Spule und Tangentenbussole einmal verstärken, einmal schwächen; der erste Kommutator hat nur den Zweck, Unsymmetrieen der Anordnung zu eliminieren. Zwei Glasskalen, die wie bei der Bestimmung des Momentes der Vergleichsperlnadeln mit Klebwachs auf Holzklötzen befestigt sind, gestatten die Entfernung der Spulenmitte von der Tangentenbussole abzulesen; etwaige Abweichungen des markierten Punktes von der wirklichen Mitte der Spulenachse werden dadurch eliminiert, dass man die Spule auf beiden Seiten der Bussole aufstellt und den halben Abstand der beiden Lagen in Rechnung setzt. Die Spulenachse bleibt stets ostwestlich; ferner ist nur in erster Hauptlage beobachtet worden, da das Gestell der Tangentenbussole ein Heranbringen der Spule von Norden oder Süden nicht gestattete.

Es sei nun i die Stromstärke, φ die Ablenkung der Nadel durch den Strom, R der Halbmesser der Tangentenbussole und

---

[1]) F. Kohlrausch, Lehrbuch der pr. Physik. XI. Auflage. 1910. Seite 500.

w die Windungsfläche der Spule. Dann übt der Strom in der Tangentenbussole das Drehmoment aus

$$i \cdot M \cdot \frac{2\pi}{R} \cdot \cos \varphi,$$

wenn M der Nadelmagnetismus ist. Die Wirkung der Spule auf die Nadel ist in erster Hauptlage

$$2 \cdot i \cdot M \cdot \frac{w}{a^3} \cos \varphi.$$

a ist der Abstand der Spulenmitte von der Tangentenbussole. Dem Zusammenwirken beider muss der Erdmagnetismus und die Fadentorsion das Gleichgewicht halten; das Drehmoment dieser beiden Kräfte ist aber proportional $M \cdot \sin \varphi$.

Nun möge φ die Ablenkung bei gleichsinniger Wirkung von Tangentenbussole und Spule bezeichnen, und φ_1 die Ablenkung bei der Wirkung im entgegengesetzten Sinne, wobei φ_1 negativ zu nehmen ist, falls der Ausschlag nach der anderen Seite als bei φ stattfindet, so bestehen die beiden Gleichungen

$$2 \cdot i \cdot \left(\frac{w}{a^3} + \frac{\pi}{R}\right) = C \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

$$2 \cdot i \cdot \left(\frac{w}{a^3} - \frac{\pi}{R}\right) = C \cdot \operatorname{tg} \varphi_1$$

Daraus ergibt sich durch Division

$$w = \frac{a^3 \pi}{R} \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_1}$$

Da im vorliegenden Falle φ und φ_1 stets entgegengesetzt waren, geht die Formel über in

$$w = \frac{a^3 \pi}{R} \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1}.$$

Dazu kommt noch wegen des Polabstandes l der Bussolennadel der Korrektionsfaktor

$$k = 1 + \frac{3}{4} \frac{l^2}{a^2} + \frac{3}{16} \frac{l^2}{R^2}.$$

Die beobachteten Ausschläge und die daraus berechneten Werte für w sind in der Tabelle 4 zusammengestellt. Da der Bussolenmagnet aus einem Kreisring besteht, ist sein Polabstand

$$l = 0{,}88 \cdot d \quad ^{1}),$$

worin d = 1,930 cm den äusseren Durchmesser bezeichnet. Ferner ist R = 19,930 cm und der Abstand der Fernrohrskala = 3055 Skalenteile. In Spalte 2 und 3 sind die der Berechnung von φ und φ_1 zu Grunde liegenden Ablenkungen in Skalenteilen angegeben; beobachtet wurde bei drei verschiedenen Stromstärken; etwaige Inkonstanz der Stromstärke ist eliminiert durch abwechselnde Ablesungen auf beiden Seiten der Tangentenbussole in gleichen Zeiträumen, z. B. so, dass auf der Ostseite der Reihe nach in den Entfernungen a, b, c und auf der Westseite in der Reihenfolge c, b, a abgelesen wurde.

Tabelle 4.

Abstand a in cm	Ablenkung φ in Skalent.	Ablenkung φ_1 in Skalent.	w in cm²
$9{,}74_5$	$198{,}4_2$	$194{,}6_9$	1,408
$7{,}74_5$	$199{,}7_6$	$192{,}8_4$	1,351
$5{,}74_5$	$205{,}1_2$	$187{,}5_0$	1,434
$8{,}65_0$	$162{,}1_2$	$157{,}8_8$	1,394
$6{,}65_0$	$164{,}4_6$	$155{,}2_3$	1,396
$4{,}65_0$	$172{,}5_3$	$147{,}6_1$	1,356
$9{,}65_0$	$161{,}0_5$	$158{,}0_5$	1,366
$7{,}65_0$	$162{,}7_9$	$156{,}5_2$	1,437
$5{,}65_0$	$167{,}0_1$	$152{,}2_2$	1,399

Daraus ergibt sich im Mittel

$$w = 1{,}39 \pm 0{,}04 \text{ cm}^2.$$

---

[1]) F. Kohlrausch. Über den Polabstand eines Magneten; a. a. O.

Dieselbe Spule hat Herr Dr. Lohmann[1]) durch geometrische Ausmessung zu

$$w = 1{,}35 \text{ cm}^2$$

bestimmt, so dass als Hauptmittel

$$w = 1{,}37 \text{ cm}^2$$

resultiert.

Mit dieser Spule wurde die Magnetfeldbestimmung in der oben erwähnten Weise ausgeführt. Sie ergab die Homogenität des Feldes, indem sich durch Bewegen der Spule innerhalb des Raumes zwischen den Polschuhen kein Ausschlag hervorrufen liess. Ferner konnte an der Stelle, die das ausserhalb der Polschuhe befindliche Ende des Kupferstabes einnehmen würde, kein Magnetfeld mehr nachgewiesen werden. In der Tabelle 5 sind die Resultate zusammengestellt. Zunächst ist für den Erdinduktor des Instituts $W = 3{,}261 \cdot 10^4$ cm^2; die Horizontalintensität des Erdmagnetismus wurde wieder zu 0,195 Gauss angenommen, da irgendwelche störenden Eisenteile nicht in der Nähe waren. Die Spalten 1 und 2 geben die durch Herausziehen der Spule und durch Umlegen des Erdinduktors bewirkten Ausschläge als Mittelwerte an. Die Beobachtungen wurden an drei verschiedenen Tagen ausgeführt. Die Stromstärke betrug bei allen Versuchen 2,0 Ampere.

Tabelle 5.

Ausschlag mit der Spule in Sktl.	Ausschlag mit dem Erdinduktor in Sktl.	$\mathfrak{H}$ in Gauss
$20{,}8_5$	$129{,}6_7$	1492,7
$18{,}1_1$	$112{,}3_7$	1496,1
$18{,}5_0$	$115{,}4_0$	1488,2

Daraus ergibt sich als Mittelwert

$$\mathfrak{H} = 1492 \pm 4 \text{ Gauss.}$$

[1]) W. Lohmann. Beiträge zur Kenntnis des Zeeman Phänomens. Inaug.-Diss. Halle 1907.

c) Die Suszeptibilität des Elektrolytkupfers.

Bei der Untersuchung der Suszeptibilität des Elektrolytkupfers kam es zunächst darauf an, einen überall gleichen Stabquerschnitt herzustellen; die Messung geschah mit dem Hommelschen Schraubendickenmesser. Der etwa 13 cm lange Stab wurde in Abständen von 1 cm gemessen, die Breitseite je einmal, die schmale an beiden Kanten und in der Mitte. Aus den Mitteln der zu einer Stabhälfte gehörenden Werte wurde der Querschnitt jeder einzelnen Hälfte bestimmt, da es ja nur auf den im Magnetfeld befindlichen Teil ankam. Es ergab das für zwei Stäbe mit rechteckigem Querschnitt:

Stab I. Querschnitt 1. $0{,}4554_8$ cm²
„ 2. $0{,}4544_5$ cm²
Länge 12,99 cm
Stab II. Querschnitt 1. $0{,}4252_3$ cm²
„ 2. $0{,}4266_8$ cm²
Länge 12,98 cm.

Ferner war besonders darauf zu achten, dass das Ende des Stabes stets an derselben Stelle des Magnetfeldes sich befand. Dazu wurde der Stab gegen einen Holzklotz tordiert, der zwischen die Polschuhe herabgelassen werden konnte, so dass seine Lage durch sie und einen festen Anschlag bestimmt war; zwei Marken auf dem Klotz mussten dann mit den kurzen Kanten des Stabes zusammenfallen; damit war die tangentiale Lage durch die passende Länge des Hebelarms von selbst gegeben. Nach Abtordieren des Stabes konnte der Holzklotz wieder entfernt werden.

Die magnetische Kompensation geschah in folgender Weise: der in der Mitte — kenntlich durch eine kleine Marke — eingeklemmte Stab wurde gegen den erwähnten Holzklotz tordiert. Diese Stellung wurde auf der Fernrohrskala abgelesen und gleichzeitig die Höhe so eingestellt, dass der horizontale Faden des Fadenkreuzes durch die Endpunkte der Millimeterstriche auf der Skala ging. Nach Herausnahme des Stabes musste dann durch Verschieben der Wismutkugel die magnetische Kompensation für genau dieselbe Einstellung des Fadenkreuzes vorgenommen werden; horizontale Änderungen liessen sich durch Verstellen des ausserhalb des Magnetfeldes befindlichen Gegengewichtes ausgleichen. Nach dem Wiedereinbringen des Stabes war dann die Einstellung

beider Fäden des Fadenkreuzes auf genau dieselben Punkte der Skala eine Gewähr dafür, dass die Wismutkugel sich an der gleichen Stelle des Magnetfeldes befand, für die die magnetische Kompensation ausgeführt worden war; auf diese Einstellung wurde auch nach Erregen des Magneten zurücktordiert.

Erwähnt sei noch die Bestimmung des Hebelarmes, das ist des Radius des Kreises, den das im Magnetfeld befindliche Stabende bei der Torsion beschreibt; unmittelbar hinter dem Aufhängedraht wurde eine Glasskala auf dem Schutzkasten senkrecht zur Symmetrieachse des Magneten befestigt. Auf diese Skala liess sich mit dem Fernrohr eines Theodolithen erstens der Draht und zweitens, nach einer horizontalen Verschiebung des Theodolithen um 15 cm und einer entsprechenden Neigung des Theodolithenfernrohrs, eine Marke auf dem Holzklotz projizieren, die der Mitte des vorderen Stabquerschnittes entsprach.

In der Tabelle 6 sind die für die Suszeptibilität ermittelten Werte zusammengestellt. Die der Rechnung zu Grunde liegende Formel ist die Seite 24 angegebene

$$\varkappa = \frac{2 \cdot D \cdot \varphi}{h \cdot \mathfrak{H}^2 \cdot Q} \cdot \frac{l}{l_1}.$$

Der Skalenabstand betrug 2928 Skalenteile. Spalte 1 charakterisiert den Stab und das im Magnetfeld befindliche Ende.

Tabelle 6.

Stab und Querschnitt	Ablenkung in Skalenteilen	$\varkappa \cdot 10^6$
I_1	$80{,}0_0$	— 0,700
I_2	$79{,}1_5$	— 0,694
I_1	$79{,}7_2$	— 0,698
I_2	$79{,}2_6$	— 0,696
II_1	$70{,}0_6$	— 0,659
II_2	$70{,}3_8$	— 0,658
II_1	$70{,}1_8$	— 0,658
II_2	$70{,}7_1$	— 0,661

Als Mittelwert für die Suszeptibilität des Elektrolytkupfers gegen Luft ergibt sich hieraus der Wert

$$\varkappa \cdot 10^6 = -0{,}68.$$

---

3. Angenäherte Bestimmung der Suszeptibilität der verschiedenen Kupferoxyde und des aus ihnen gewonnenen Kupfers.

Auch zur Ermittlung der Suszeptibilität von Substanzen in Pulverform lässt sich der Torsionsapparat leicht ändern. Anstelle des festen Kupferstabes wird ein Glasrohr eingeklemmt, das mit dem betreffenden Pulver gefüllt ist; der Apparat mit Glasrohr wird vorher kompensiert. Da aber der Querschnitt des Rohres von dem Pulver nicht voll ausgefüllt wird, sondern erst durch Vergleich der Volumina des Glasrohres und des Pulvers annähernd bestimmt werden muss, so gibt auch das Resultat nur einen Näherungswert. Dann ist es aber einfacher, sich auf eine Vergleichssubstanz zu beziehen und die Proportionalität der Suszeptibilität mit der Ablenkung — bei gleichem Querschnitt — zur Rechnung zu verwenden. Die Bestimmung für Elektrolytkupfer und für Mercksches Kupferoxyd nach dieser Methode ergibt eine leidliche Übereinstimmung mit den von St. Meyer [1]) gefundenen Werten.

Gebe das Rohr mit der Vergleichssubstanz, Wasser, gefüllt den Ausschlag α, mit m Gramm des Pulvers vom spezifischen Gewicht σ gefüllt den Ausschlag β, und sei $\varkappa_0$ die Suszeptibilität des Wassers gegen Luft, so gilt für die gesuchte Suszeptibilität $\varkappa$ bei gleichem Querschnitt die Beziehung

$$\varkappa : \varkappa_0 = \beta : \alpha.$$

Nun verhalten sich aber die Querschnitte wie die Volumina, um also auf gleichen Querschnitt zu reduzieren, muss der Ausschlag für das Pulver noch mit $\frac{V \cdot \sigma}{m}$ multipliziert werden, wenn V das Volumen des Rohres bedeutet. Das gibt für $\varkappa$ die Formel:

[1]) Vergl. Seite 18 und 36.

$$\varkappa = \frac{\varkappa_0 \cdot \beta \cdot V \cdot \sigma}{m \cdot \alpha}$$

Das ebenfalls etwa 13 cm lange Glasrohr war an dem im Magnetfeld befindlichen Ende zugeschmolzen und wurde stets bis an eine dicht am anderen, offenen Ende befindliche Marke gefüllt; das Volumen bis zu dieser Marke ergab sich durch Auswägen mit Quecksilber zu 1,499 cm^3.

Nach der obigen Formel sind die in Tabelle 7 zusammengestellten Resultate ermittelt. Die erste Spalte charakterisiert die Substanz; das Kupfer ist stets durch Reduktion aus Kupferoxyd der in Klammern beigefügten Herkunft gewonnen; Cu (elektr.) bedeutet Kupfer, das aus seinerseits wieder aus Elektrolytkupfer hergestelltem Kupferoxyd — mit Cu O (elektr.) bezeichnet — reduziert ist. Die Herstellung des Oxydes und Oxyduls geschah nach der bereits beschriebenen Methode. Die spezifischen Gewichte von

5,88 für Kupferoxydul
6,40 für Kupferoxyd
und 8,92 für Kupfer

sind den physikalisch-chemischen Tabellen von Landolt und Börnstein[1]) entlehnt. Die Ablenkung des mit destilliertem Wasser gefüllten Rohres betrug + 20,9 Skalenteile, und die Suszeptibilität für Wasser gegen Luft wurde aus Winkelmanns[2]) Handbuch zu $\varkappa \cdot 10^6 = 0{,}804$ entnommen. Die in der letzten Spalte der Tabelle mit dem Zusatz „grösser als“ angegebenen Werte würden sich ergeben, wenn man die Ablenkung zu 1000 Skalenteilen annimmt.

---

[1]) Landolt und Börnstein a. a. O.

[2]) Winkelmann. Handbuch der Physik. Bd. V. Auflage II. 1908. Seite 271.

Tabelle 7.

Substanz	Gewicht m in gr	Ablenkung in Skalenteilen	$\varkappa \cdot 10^6$
Cu_2O (elektr.)	$1{,}63_6$	$+3{,}0$	$+0{,}62$
CuO (elektr.)	$2{,}11_8$	$+105{,}6$	$+18{,}4$
CuO (Merck)	$5{,}64_4$	$+326{,}7$	$+21{,}4$
CuO (Kahlb.)	$3{,}75_2$	Skala aus dem Gesichtsfeld	grösser als $+98{,}4$
Cu (elektr.)	$1{,}99_5$	$-2{,}5$	$-0{,}64$
Cu (Merck)	$3{,}24_0$	Skala aus dem Gesichtsfeld	grösser als $+154{,}9$
Cu (Kahlb.)	$2{,}19_1$	$+818{,}7$	$+192{,}2$

St. Meyer[1]) gibt für Merckses Kupferoxyd in seiner Originalarbeit zwar $\varkappa \cdot 10^6 = +2{,}90$ an, ändert diesen Wert in einer Berichtigung zu Winkelmanns[2]) Handbuch aber in $+19{,}8$ um; die Berichtigung des für Kupferoxydul Merck in der Originalarbeit angegebenen Wertes 1,21 fehlt. Auffällig ist die geringe Differenz der Suszeptibilitäten für das Mercksche und das aus Elektrolytkupfer gewonnene Kupferoxyd gegenüber der ausserordentlich grossen Differenz zwischen den aus den Oxyden reduzierten Kupferarten. Eine Erklärung liefert die bereits beim permanenten Magnetismus erwähnte Annahme: bei dem Kupferoxyd liegt auch das Eisen als Eisenoxyd vor; da dieses nur paramagnetisch[3]) ist, können die vorhandenen Spuren sich nur minimal bemerkbar machen. Durch die Reduktion im Wasserstoffstrome geht es aber in ferromagnetisches Eisen über, hier

[1]) St. Meyer. Magnetisierungszahlen anorganischer Verbindungen. Wiedem. Ann. Bd. 69 (1899) Seite 240.

[2]) Winkelmann, Handbuch der Physik. Bd. V. Aufl. II. 1908. S. 969.

[3]) St. Meyer a. a. O.

haben die Verunreinigungen in Bezug auf die Suszeptibilität also einen erheblich grösseren Einfluss. Weniger wahrscheinlich ist die Annahme von Gray und Ross, dass eine magnetische Verbindung des Kupfers mit minimalen Mengen Eisens entstehe. Bei dem Kupferoxyd Kahlbaum ist die Erscheinung der Zunahme der Suszeptibilität durch die Reduktion zu metallischem Kupfer nicht so ausgeprägt.

4. Der Einfluss der Oxydbildung und thermischer Behandlung auf die Suszeptibilität.

Da reines Kupfer diamagnetisch ist, reines Kupferoxyd aber paramagnetisch, so ist es leicht einzusehen, dass das Kupfer durch genügende Oxydation von dem diamagnetischen in den paramagnetischen Zustand übergehen muss. Die Ausführung dieses Versuches ist aber nicht so ganz einfach. Zunächst sei erwähnt, dass sich an den festen Stäben aus Elektrolytkupfer ein Einfluss des infolge des Glühprozesses auf ihnen haftenden Oxydes auf die Suszeptibilität nicht feststellen liess. Ebenso wenig konnte irgendwelche Beeinflussung durch die thermische Behandlung, wie sie bei der Untersuchung des permanenten Magnetismus durchgeführt wurde, beobachtet werden. Auch vollständiges Umschmelzen des Kupfers im elektrischen Widerstandsofen aus kleinen Stücken zu einem festen Stab änderte den Diamagnetismus des Elektrolytkupfers und den Paramagnetismus der beiden anderen Kupferarten nicht. Bei diesen Versuchen wurde die Substanz in einem Quarzrohr in den Ofen eingeführt und die Temperatur bis etwa 1200^0 gesteigert; die Messung der Temperatur geschah mit einem Thermoelement nach Le Chatelier aus Platin-Platinrhodium. Nach Erkalten und nach Zertrümmern des Quarzrohres hatte das Kupfer — von der grossen Zahl Luftblasen abgesehen — die Gestalt des inneren Rohres. Zersägen des Elektrolytkupfers in kleine, dünne Streifen und Oxydieren dieser Streifen durch Erhitzen bis zu schwacher Rotglut lieferte gleichfalls nicht eine solche Menge Oxyd, dass eine Anziehung hervorgerufen werden konnte.

Schliesslich gelang der Versuch mit dem aus Kupferoxyd,

das selbst wieder aus Elektrolytkupfer gewonnen war, durch Reduktion hergestellten, pulverförmigen Kupfer; bei der feinen Verteilung, d. h. der relativ sehr grossen Oberfläche, genügte sogar schon die natürliche Oxydbildung. Nachdem durch Vorversuche der Einfluss qualitativ festgestellt war, wurde die auch zur Ermittlung der Suszeptibilität verwendete Probe zu einer angenäherten quantitativen Ermittlung nach der beschriebenen Methode benutzt; sofort nach dem Einfüllen in das Glasrohr des Torsionsapparates ergab sich die in der Tabelle 7 angegebene Ablenkung von — 2,5 Skalenteilen. In dem Masse nun, wie die Oxydbildung — sichtbar an einer Dunkelfärbung — von dem ausserhalb des Magnetfeldes befindlichen offenen Ende des Rohres nach den Polschuhen hin weiterschritt, änderte sich die Ablenkung kontinuierlich nach der positiven Seite zu. Nach 11 Tagen zeigte sich eine Anziehung um 4,3 Skalenteile. Das entspricht einer Änderung der Suszeptibilität von — 0,64 nach + 1,11.

III. Zusammenfassung der Resultate.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit lassen sich dahin zusammenfassen:

I. Zum permanenten Magnetismus.

1. Elektrolytkupfer lässt sich nicht magnetisieren und auch durch keine Art thermischer Behandlung in einen permanent magnetisierbaren Zustand bringen.

2. Reines Kupferoxyd und Kupferoxydul sind ebenfalls nicht permanent magnetisierbar.

3. Das käufliche Kupferoxyd der Firmen Merck und Kahlbaum dagegen liess sich magnetisieren; das aus ihm durch Reduktion im Wasserstoffstrom gewonnene Kupfer zeigte einen stärkeren Magnetismus als das Oxyd selbst.

II. Zum induzierten Magnetismus.

1. Elektrolytkupfer ist diamagnetisch und behält seinen Diamagnetismus auch nach jeder Art thermischer Behandlung.

2. Reines Kupferoxyd und Kupferoxydul sind paramagnetisch; durch genügend starke Oxydation kann daher das Kupfer aus dem diamagnetischen in den paramagnetischen Zustand übergehen.

3. Das aus dem Kupferoxyd der Firma Merck durch Reduktion gewonnene Kupfer zeigt einen stärkeren Paramagnetismus als das Oxyd selbst.

Die unter I_3 und II_3 angeführten Erscheinungen lassen sich durch zwei Annahmen erklären:

1. Durch die von Gray und Ross ausgesprochene Vermutung, dass das Kupfer — beim Glühen — mit geringen Spuren Eisens eine Verbindung eingeht, die stärker magnetisch ist, als dem Eisengehalt entspricht;

2. oder wahrscheinlicher, durch die Annahme, dass das als Verunreinigung im Kupferoxyd enthaltene Eisen als Eisenoxyd

vorliegt, das durch die Reduktion in das erheblich stärker magnetische metallische Eisen verwandelt wird.

Erwähnt sei schliesslich noch, dass der Torsionsmodul des Platiniridiums zu 9535 kg Gew. mm^{-2} bestimmt wurde.

Die vorliegenden Untersuchungen wurden von Weihnachten 1909 bis Weihnachten 1910 im Physikalischen Institute der Universität Halle a. S. durchgeführt. Es sei mir auch an dieser Stelle gestattet, meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. E. Dorn für die freundliche Anregung zu dieser Arbeit und für die stetige liebenswürdige Unterstützung und Beratung bei ihrer Ausführung meinen herzlichsten Dank ergebenst auszusprechen.

Lebenslauf.

Geboren bin ich, Feodor Behnsen, am 3. November 1885 in Lutter am Barenberge als Sohn des Güterexpedienten Feodor Behnsen und seiner Ehefrau Luise geb. Holtzberg. Ich bin evangelischer Konfession und preussischer Staatsangehörigkeit. Meine Schulbildung erhielt ich auf der Volksschule in Neinstedt am Harz, der Vorschule und dem Gymnasium in Quedlinburg und auf dem Domgymnasium zu Magdeburg. Michaelis 1904 verliess ich diese Anstalt mit dem Zeugnis der Reife und war $2^1/_2$ Jahr bei der Eisenbahn als Zivilsupernumerar tätig. Ostern 1907 bezog ich die Universität Halle-Wittenberg, um mich dem Studium der Mathematik und der exakten Naturwissenschaften zu widmen.

Die mündliche Doktorprüfung bestand ich am 23. Februar 1911.

Meine Lehrer waren die Herren Professoren

Dorn, Ebbinghaus †, Fries, Goldschmidt, Grenacher, Gutzmer, Luedecke †, Menzer, Meumann, Noll †, K. Schmidt, H. Schwarz, Volhard †, Vorländer, Walter, Wangerin, Wüst.

Allen diesen meinen verehrten Lehrern bin ich zu grossem Danke verpflichtet.